

ESTIMATIVA DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE EDIFICAÇÕES CLIMATIZADAS NÃO RESIDENCIAIS UTILIZANDO DADOS CLIMÁTICOS SIMPLIFICADOS

Fernando Simon Westphal

UFSC / CTC / ECV / LabEEE – Campus Universitário – Trindade, Cx. Postal 476 CEP 88040-900 – Florianópolis, SC
fernando@labeee.ufsc.br

Roberto Lamberts

UFSC / CTC / ECV / LabEEE – Campus Universitário – Trindade, Cx. Postal 476 CEP 88040-900 – Florianópolis, SC
lamberts@ecv.ufsc.br

José Antônio Bellini da Cunha Neto

UFSC / CTC / EMC / LMPT – Campus Universitário – Trindade, Cx. Postal 476 CEP 88040-900 – Florianópolis, SC
bellini@lmpt.ufsc.br

Resumo. Este trabalho apresenta uma metodologia para estimativa de consumo de energia elétrica em edificações não residenciais climatizadas utilizando-se dados climáticos simplificados. A partir das temperaturas média das máximas e média das mínimas mensais são gerados os dois dias extremos de carga térmica para cada mês do ano: o dia de maior pico de carga térmica e o dia com o pico de carga térmica mais baixo do mês. O cálculo da carga térmica para esses dias é feito através do Transfer Function Method (TFM), apresentado no ASHRAE Handbook of Fundamentals 1997. O consumo mensal de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar é estimado a partir de curvas de desempenho dos equipamentos e os valores horários de carga térmica ocorrida no ambiente. A acuracidade do método é avaliada através de simulações no software VisualDOE (interface gráfica do DOE-2.1E para PC). Para os protótipos simulados, a diferença entre o consumo anual de energia estimado pelo método e o simulado no VisualDOE foi inferior a 15%.

Palavras chave: simulação energética, eficiência energética, dados climáticos.

1. Introdução

Os programas para simulação termo-energética de edificações passaram a ser mais difundidos a partir da década de 70, após a crise do petróleo e proliferação dos microcomputadores pessoais. As novas ferramentas computacionais permitem a engenheiros e arquitetos analisar fenômenos complexos, como a transferência de calor em regime transiente através de componentes construtivos. Geralmente, problemas deste tipo envolvem cálculos matriciais e iterações que dificultam sua resolução manual.

Dentre os diversos programas de simulação energética de edificações existentes, o Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) vêm utilizando o VisualDOE2.6, uma interface do DOE-2.1E para sistema operacional Windows. O DOE-2.1E simula o consumo de energia de edificações a partir de informações climáticas horárias da região, descrição arquitetônica e construtiva do prédio, padrões de uso e ocupação, potência instalada em iluminação, equipamentos e características do sistema de condicionamento de ar (LBL/LANL, 1982).

A maioria dos programas computacionais para análise térmica e energética de edificações utiliza arquivos com dados climáticos horários de um ano para representar a influência do ambiente externo sobre a edificação. Geralmente, esses arquivos são obtidos em estações meteorológicas de aeroportos e necessitam de tratamento adequado para adaptá-los ao formato do software de simulação energética desejado. O custo desses arquivos é alto e o tratamento das informações exige elevado tempo de dedicação por parte do analista. Atualmente, o LabEEE possui arquivos climáticos de apenas 14 cidades brasileiras tratados para uso no VisualDOE (Goulart et al., 1998).

O presente trabalho apresenta uma metodologia para estimativa de consumo de energia elétrica de edificações não residenciais artificialmente condicionadas por aparelhos de expansão direta, utilizando-se dados de temperatura de bulbo seco, umidade relativa e pressão atmosférica extraídos das Normas Climatológicas 1961/1990 (DNMET, 1992). O Departamento Nacional de Meteorologia (DNMET) do Ministério de Agricultura e Reforma Agrária apresenta esses dados para 206 estações meteorológicas, abrangendo praticamente todo o território nacional. Além dessa base de dados, as secretarias de agricultura e diversos órgãos ligados à EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) possuem essas informações monitoradas em vários municípios do país.

A partir das médias das temperaturas máximas e mínimas diárias são gerados os dois dias extremos de carga térmica para cada mês do ano: o dia de maior pico de carga térmica e o dia com o pico de carga térmica mais baixo do mês. O cálculo da carga térmica para esses dias é feito através do método dos fatores de resposta (*Transfer Function Method*), apresentado no Manual de Fundamentos da ASHRAE (ASHRAE, 1997). O consumo mensal de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar é estimado a partir de curvas de desempenho dos equipamentos e dos valores horários de carga térmica ocorrida no ambiente climatizado. Para os demais sistemas da edificação (iluminação e outros equipamentos elétricos) o consumo de energia é obtido pela integração da potência solicitada no decorrer do período de utilização. Todo o algoritmo de cálculo foi transcrito em linguagem VisualBasic e a verificação do método é feita através da simulação de um ambiente no programa desenvolvido aplicando-se a metodologia proposta e no VisualDOE.

2. Revisão bibliográfica

O condicionamento ambiental representa 48% da energia elétrica consumida nos setores público e comercial do país GELLER (1991). Medidas para redução do consumo de energia desse sistema envolvem desde o projeto arquitetônico do prédio até o sistema de controle dos equipamentos de climatização. Estimar o consumo de energia elétrica de um aparelho de ar-condicionado e propor alternativas para minimizar esse consumo têm sido objetos de estudo de diversos pesquisadores desde as primeiras décadas do século XX. Não só a eficiência energética, mas também o próprio projeto de um sistema de condicionamento de ar deve levar em conta inúmeras variáveis que exercem influência sobre a carga térmica no interior da edificação.

O dimensionamento de um condicionador de ar é orientado para suportar a carga térmica máxima ocorrida na edificação. Para isso, devem ser consideradas as zonas térmicas que cada climatizador irá atender, as contribuições relativas de cada ganho de calor na carga térmica total e a probabilidade de ocorrência dessa carga máxima.

O uso de simulação computacional tem possibilitado o desenvolvimento de diversas metodologias para determinação da carga térmica de edificações. O Manual de Fundamentos da ASHRAE (ASHRAE, 1997) apresenta 4 metodologias para esse cálculo: Balanço Térmico, Fatores de Peso (TFM), CLTD/CLF e TETD/TA; sendo que o Balanço Térmico é o que apresenta maior precisão. Porém, nenhum desses métodos consegue representar o processo completo e detalhado de transferência de calor, que resultaria em um modelo muito complexo e impraticável, mesmo com o avanço tecnológico atual. Os métodos existentes calculam a carga térmica em, pelo menos, 2 etapas. Na primeira, considera-se os ganhos (fluxos) de calor entrando na zona. Em seguida, considera-se esse calor sendo retirado pelo sistema de climatização.

O método do Balanço Térmico é dividido em 4 processos principais: balanço térmico na superfície externa da parede (ou cobertura), condução de calor através da parede (ou cobertura), balanço térmico na superfície interna da parede (ou cobertura) e balanço térmico no ar interno.

O método CLTD/CLF (*Cooling Load Temperature Difference*) trabalha com valores tabelados para situações específicas e, sendo muito limitado, a ASHRAE decidiu abandonar a pesquisa e investir em métodos mais promissores. A falta de validação científica também obrigou a suspensão do desenvolvimento do método TETD/TA, que depende muito da experiência do usuário para sua aplicação bem sucedida. De acordo com esse método, a equação básica da transferência de calor através de uma superfície opaca é aplicada usando-se os valores de TETD (*Total Equivalent Temperature Difference*) no lugar da diferença entre a temperatura externa e interna. Os valores de TETD são tabelados para determinados componentes construtivos, determinada latitude, temperatura interna média, temperatura externa máxima e variação de temperatura externa. Segundo Hill e Furlong (1973) a precisão do método TETD/TA é maior para paredes e coberturas mais pesadas, o que não é comum no Brasil.

O método mais próximo ao Balanço Térmico é o TFM (*Transfer Function Method*) e devido a sua simplicidade de aplicação aliada à satisfatória precisão dos resultados foi o método escolhido para a utilização neste trabalho. Esse método aplica uma primeira série de fatores de peso para representar a inércia térmica de superfícies opacas no processo de condução de calor. Uma segunda série de coeficientes é aplicada sobre os ganhos de calor e de cargas que possuem componentes radiantes. Esses coeficientes procuram representar o armazenamento de calor na envoltória da edificação e objetos no seu interior, antes de transferi-lo ao ar como carga térmica a ser removida pelo climatizador. Segundo Mitalas (1972), a grande vantagem do TFM é avançar um passo além do cálculo de carga térmica, permitindo o cálculo da taxa de extração de calor e da temperatura interna da sala.

3. Metodologia

3.1. Cálculo da carga térmica

O TFM foi o método escolhido para o desenvolvimento dos cálculos de carga térmica, dentro da metodologia proposta. Além de ser o método mais próximo do Balanço Térmico, a diversidade de coeficientes tabelados para componentes construtivos permite a aplicação direta às tecnologias construtivas comumente encontradas em edificações não residenciais. Outra vantagem do TFM é a possibilidade de análise da influência do padrão de operação do sistema de condicionamento de ar no consumo de energia e na temperatura interna do ambiente.

Desde a década de 70 até o ano 2001, o TFM foi adotado pela ASHRAE como método básico para cálculo de carga térmica em edificações. Neste período, o método foi aplicado em diversos softwares de simulação térmica e energética,

incluindo o DOE-2.1E, para o qual o LabEEE é suporte na América do Sul desde 1994. Em 2001, a nova versão do Manual de Fundamentos da ASHRAE (ASHRAE, 2001) introduziu o Balanço Térmico como o método básico para cálculo de carga térmica, dado o avanço tecnológico dos microcomputadores e das linguagens de programação, permitindo o desenvolvimento de programas detalhados e com interfaces amigáveis. Entretanto, a metodologia proposta neste trabalho mantém a adoção do método simplificado TFM, dada a facilidade de aplicação e disponibilidade de coeficientes tabelados para diversos tipos de componentes construtivos.

O procedimento de cálculo através do TFM é baseado em dois conceitos importantes: Funções de Transferência por Condução ou CTF (*Conduction Transfer Functions*) e Fatores de Peso ou WF (*Weighting Factors*). Os CTFs e WFs são coeficientes que relacionam o valor atual de uma variável com os seus valores anteriores e de outras variáveis em um intervalo de tempo definido, geralmente de 1 hora.

Os coeficientes CTF são utilizados para descrever o fluxo de calor por condução através de fechamentos opacos (paredes e coberturas), combinando os efeitos da convecção e radiação nas duas superfícies limitantes (interna e externa). O fluxo de calor em um determinado instante é calculado em função dos valores de fluxo dos instantes anteriores e dos valores de temperatura interna e externa. Os coeficientes CTF podem ser calculados analiticamente e dependem das propriedades físicas do componente construtivo e do coeficiente de convecção nas superfícies interna e externa. Neste trabalho, são utilizados os valores tabelados de CTF apresentado em ASHRAE (1997), para 41 tipos de paredes e 42 tipos de coberturas. Esses valores consideram coeficiente de convecção externa (h_o) igual a $17,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e coeficiente de convecção interna (h_i) igual a $8,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Os valores de CTF são selecionados para um componente construtivo semelhante ao de interesse, devendo ser corrigidos em função da relação entre a transmitância térmica do componente real e do componente tabelado. A seleção dos valores adequados dos coeficientes CTF para cada parede e cobertura é apresentada em ASHRAE (1997) e consiste basicamente na definição dos seguintes fatores:

- a) faixa de resistência térmica ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) na qual o componente está enquadrado;
- b) material construtivo dominante (maior densidade e resistência térmica);
- c) posição do material dominante no componente (interna, externa ou distribuído no componente);
- d) material secundário – acabamento, no caso de paredes, ou existência de forro, no caso de coberturas.

Os Fatores de Peso (WF), também chamados de Funções de Transferência ao Ambiente ou RTF (*Room Transfer Functions*) relacionam a carga térmica horária devido a cada tipo de ganho de calor com os valores prévios daquele ganho e valores prévios da carga térmica gerada por aquele ganho. A porção do ganho de calor transmitida por convecção é adicionada instantaneamente ao valor da carga térmica do ambiente calculada para o instante determinado. A porção do ganho de calor transmitida por radiação deverá ser absorvida pelas superfícies e objetos do ambiente antes de ser adicionada à carga térmica do ambiente. A transferência dessa parcela do ganho de calor ao ar, como carga térmica, é feita através dos fatores de peso, determinados para cada ambiente em função das suas características térmicas e da natureza do ganho de calor.

Sowell (1988) calculou Fatores de Peso para 200.640 tipos de zonas térmicas (ou ambientes) resultantes da variação de 14 parâmetros diferentes, incluindo o número de paredes externas, geometria da zona, área envidraçada, tipo de parede, cobertura e piso. Os resultados formaram grupos de zonas que apresentam comportamentos semelhantes. Para uso do TFM na metodologia proposta neste trabalho serão aplicados os fatores de peso apresentados nas tabelas 24 e 25 do capítulo 28 do Manual de Fundamentos da ASHRAE para diferentes tipos de ganho de calor e de inércia térmica do ambiente (ASHRAE, 1997).

3.2. Dados climáticos

O objetivo principal deste trabalho é determinar um método para cálculo do consumo mensal de energia elétrica de sistemas de condicionamento de ar a partir de dados climáticos simplificados. Ao invés de arquivos climáticos de dados horários, são utilizados os dados mensais de temperatura, pressão e umidade relativa, disponíveis nas Normas Climatológicas 1961/1990 (DNMET, 1992) para 206 localidades brasileiras.

O perfil horário de temperatura do ar externo é gerado a partir do percentual da amplitude média mensal para cada hora do dia, apresentados por Goulart et al. (1998). Inicialmente, pensou-se em utilizar a média das temperaturas máximas e mínimas diárias para gerar um dia típico para cada mês, aplicando-se o percentual da amplitude média mensal. O consumo de energia seria representado pela multiplicação do consumo estimado para o dia típico pelo número de dias de cada mês. Porém, o uso de apenas um dia típico mensal não permite a representação do consumo mensal de energia elétrica da edificação nos meses em que há uma forte variação de temperatura de um dia para o outro. Esta variação pode ser mais acentuada em um clima como o de Florianópolis (latitude $27^{\circ}40' \text{ S}$) e menos acentuada no clima de Belém (latitude $1^{\circ}23' \text{ S}$), por exemplo. Para representar melhor a variação no perfil de temperatura no decorrer do mês optou-se pela determinação de dois dias típicos mensais: um correspondente ao dia de maior pico de carga térmica, denominado “dia de pico”, e outro correspondente ao dia de menor pico de carga térmica do mês, denominado “dia de base”. Os demais dias do mês são gerados através de interpolação linear entre os dois extremos, conforme mostra a Fig. (1).

De acordo com o esquema apresentado na Fig. (1), no consumo mensal de energia elétrica em condicionamento de ar são computados apenas aqueles dias em que o pico de carga térmica é positivo (área hachurada).

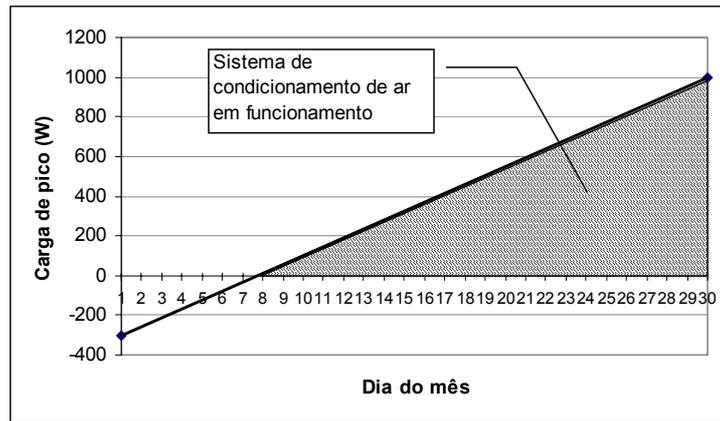


Figura 1. Interpolação do consumo de energia em condicionamento de ar entre dois dias típicos de um mês.

Para os dois dias típicos mensais é desenvolvido o cálculo de carga térmica considerando-se todas as variáveis envolvidas no método adotado (TFM). O padrão de uso da edificação, a potência instalada em equipamentos, iluminação e condicionamento de ar assumem os mesmos valores para dos dois dias: de pico e de base.

Os dois dias típicos são gerados a partir dos valores de temperatura correspondentes à frequência de ocorrência de temperaturas iguais ou inferiores a 95% para o “dia de pico” e 5% para o “dia de base”. Aplicando-se o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov verificou-se, com 95% de confiabilidade, que as temperaturas mínimas e máximas mensais apresentam distribuição normal. Estatisticamente, as temperaturas máxima e mínima do dia de pico seriam representadas pelas Eq. (1) e (2), e do dia de base pelas Eq. (3) e (4).

$$T_{picomax} = 1,645 \times S_{max} + T_{medmax} \tag{1}$$

$$T_{picomin} = 1,645 \times S_{min} + T_{medmin} \tag{2}$$

$$T_{basemax} = -1,645 \times S_{max} + T_{medmax} \tag{3}$$

$$T_{basemin} = -1,645 \times S_{min} + T_{medmin} \tag{4}$$

Nas Eq. (1) a (4), $T_{picomax}$ e $T_{picomin}$ representam, respectivamente, as temperaturas máxima e mínima para o dia de pico, assim como $T_{basemax}$ e $T_{basemin}$ representam as temperaturas máxima e mínima para o dia de base. S_{max} e S_{min} representam, respectivamente, o desvio padrão das temperaturas máximas e mínimas para cada mês do ano. T_{medmax} e T_{medmin} correspondem às médias das temperaturas máximas e mínimas diárias.

Os valores 1,645 e -1,645 são os valores da variável z (distribuição normal) para os quais há uma a probabilidade de 95% e 5% de ocorrência de valores de temperatura iguais ou inferiores ao valor calculado, conforme indica a Fig. (2).

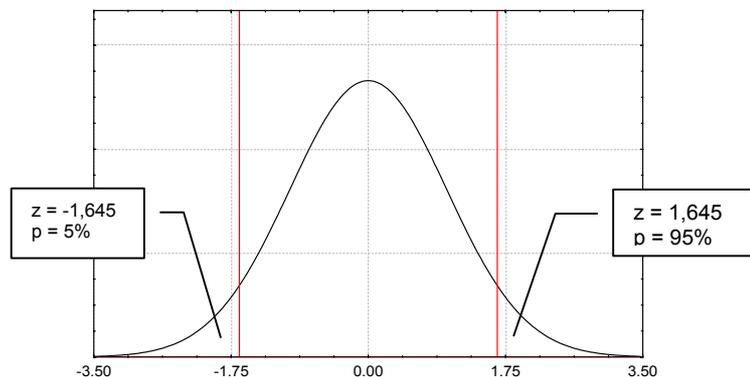


Figura 2. Distribuição normal de probabilidades.

As Normais Climatológicas não fornecem os valores de desvio padrão das temperaturas máximas e mínimas diárias para cada mês. Porém, utilizando-se os arquivos TRY (*Test Reference Year*) de 14 cidades brasileiras da base de dados do LabEEE esses valores foram calculados, investigando-se alguma correlação com as variáveis disponíveis nas Normais Climatológicas, de forma que pudessem ser estimados para as 206 estações meteorológicas disponíveis na base de dados do Departamento Nacional de Meteorologia (DNMET).

Iniciou-se a análise confrontando-se o desvio padrão das temperaturas médias das máximas mensais das 14 cidades com valores de amplitude média mensal, temperatura média mensal e amplitude absoluta, não sendo detectada nenhuma correlação. A falta de dependência entre os desvios e as amplitudes médias mensais é apresentada no gráfico da Fig. (3) para as cidades de Belém e Florianópolis. Em ambos os gráficos foram assinalados, para cada mês, os valores de desvio padrão das temperaturas máximas no eixo das ordenadas e os valores de amplitude média no eixo das abscissas. Visualmente, é possível perceber a independência entre as duas variáveis.

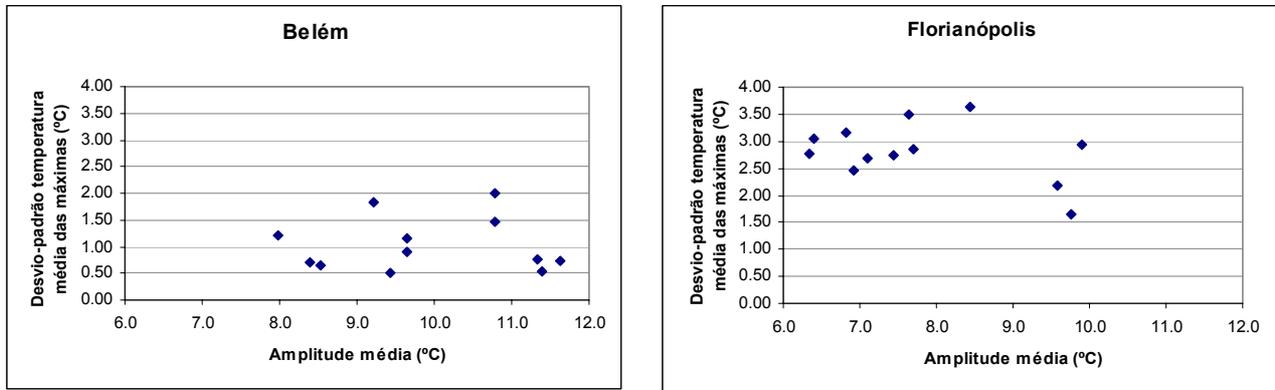


Figura 3. Amplitude média mensal e desvio padrão das médias das temperaturas máximas para as cidades de Belém e Florianópolis.

Já que não é possível estimar o desvio padrão das temperaturas máximas em cada mês, optou-se por utilizar o desvio padrão médio dos 12 meses, porém essa média ainda é disponível somente para as 14 cidades para as quais se tem os dados climáticos horários. Analisando-se o desvio padrão das temperaturas máximas diárias de cada mês para cada cidade percebe-se que a variação desses valores apresenta certa relação com a variação das médias das temperaturas máximas diárias, ou seja, se em uma cidade as temperaturas máximas variam muito de um dia para o outro, provavelmente deverão variar de maneira semelhante de um mês para o outro.

A Tab. (1) apresenta, para a cidade de Florianópolis, as médias mensais das temperaturas máximas e mínimas, a amplitude média mensal e o desvio padrão das temperaturas máximas e mínimas para cada mês do ano. Os dados foram obtidos do arquivo TRY e as duas últimas linhas da tabela apresentam as médias dos desvios e o desvios das temperaturas médias mensais. Compilando-se o mesmo grupo de informações dos arquivos TRY das outras 13 cidades, estabeleceu-se as relações apresentadas nos gráficos das Fig. (4) e (5).

Tabela 1. Dados climáticos para a cidade de Florianópolis utilizados na metodologia proposta.

Mês	T _{medmin}	T _{medmax}	S _(Tmin)	S _(Tmax)	Amplitude Média
Janeiro	21,6	29,3	1,8	3,50	7,6
Fevereiro	21,2	28,2	1,7	2,46	6,9
Março	21,4	28,2	2,1	3,15	6,8
Abril	17,2	26,9	2,5	1,66	9,8
Mai	14,7	24,3	2,6	2,19	9,6
Junho	12,5	22,5	3,9	2,95	9,9
Julho	13,8	22,2	3,1	3,64	8,4
Agosto	13,7	21,2	3,9	2,75	7,4
Setembro	16,4	22,7	1,9	2,77	6,3
Outubro	16,9	23,3	2,2	3,04	6,4
Novembro	18,0	25,2	2,4	2,67	7,1
Dezembro	19,1	26,8	2,3	2,86	7,7
Desvio padrão	3,16^a	2,75^b			
Média			2,53^c	2,80^d	

Notas: a. Representa $S_{(T_{medmin})}$.
 b. Representa $S_{(T_{medmax})}$.
 c. Representa $\bar{S}_{(Tmin)}$.
 d. Representa $\bar{S}_{(Tmax)}$.

A Fig. (4) confirma a relação entre a média dos desvios padrões das temperaturas máximas diárias (registros de 28, 30 e 31 dias, dependendo do mês do ano) e o desvio das médias mensais das temperaturas máximas (12 valores), com coeficiente de determinação igual a 0,7538.

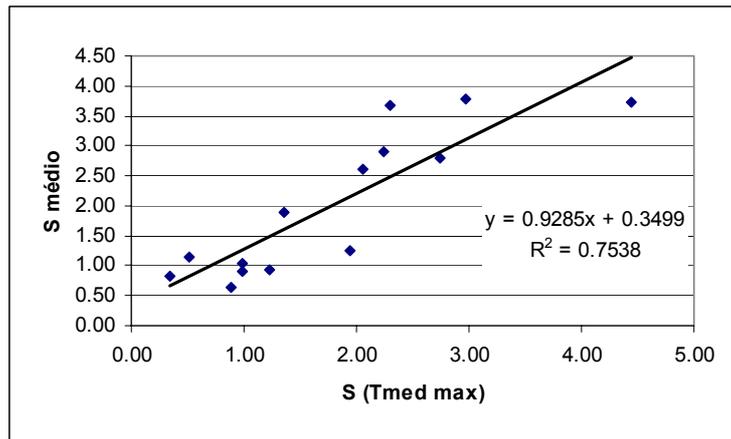


Figura 4. Relação entre a média dos desvios das temperaturas máximas diárias ($S_{\text{médio}}$) e o desvio padrão das médias das temperaturas máximas ($S_{(T_{\text{medmax}})}$), para 14 cidades brasileiras.

O mesmo tipo de relação pode ser estendida para as temperaturas mínimas, sendo que neste caso o coeficiente de determinação é melhor, 0,8513, conforme indicado na Fig. (5).

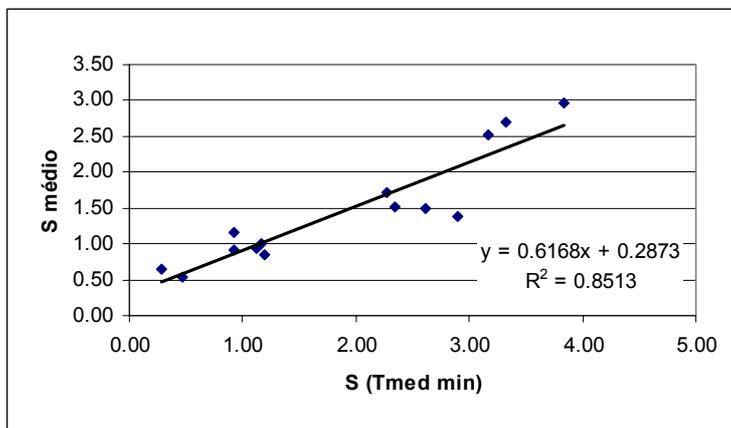


Figura 5. Relação entre a média dos desvios das temperaturas mínimas diárias ($S_{\text{médio}}$) e o desvio padrão das médias das temperaturas mínimas ($S_{(T_{\text{medmin}})}$), para 14 cidades brasileiras.

O desvio padrão médio das temperaturas máximas ($\bar{S}_{(T_{\text{max}})}$) é calculado de acordo com a Eq. (5), em função do desvio padrão das médias das temperaturas máximas ($S_{(T_{\text{medmax}})}$). De maneira semelhante, o desvio padrão médio das temperaturas mínimas ($\bar{S}_{(T_{\text{min}})}$) é calculado de acordo com a Eq. (6).

$$\bar{S}_{(T_{\text{max}})} = 0,9285 \times S_{(T_{\text{medmax}})} + 0,3499 \quad (5)$$

$$\bar{S}_{(T_{\text{min}})} = 0,6168 \times S_{(T_{\text{medmin}})} + 0,2873 \quad (6)$$

Utilizando-se as Eq. (5) e (6) para obter o desvio padrão médio das temperaturas de cada cidade, as Eq. (1) a (4) são ajustadas, gerando-se as Eq. (7) a (10). O desvio padrão médio é obtido tanto para as temperaturas máximas diárias quanto para as mínimas, estimando-se os extremos de temperatura para os dias de pico e de base.

$$T_{\text{picomax}} = 1,645 \times \bar{S}_{(T_{\text{max}})} + T_{\text{medmax}} \quad (7)$$

$$T_{\text{picomin}} = 1,645 \times \bar{S}_{(T_{\text{min}})} + T_{\text{medmin}} \quad (8)$$

$$T_{\text{basemax}} = -1,645 \times \bar{S}_{(T_{\text{max}})} + T_{\text{medmax}} \quad (9)$$

$$T_{\text{basemin}} = -1,645 \times \bar{S}_{(T_{\text{min}})} + T_{\text{medmin}} \quad (10)$$

A Fig. (6) ilustra a obtenção dos picos mínimos e máximos de temperatura dos dois dias típicos. Observa-se que a média das temperaturas máximas (T_{medmax}) origina a temperatura máxima do dia de pico e temperatura máxima do dia de base. A partir da média das temperaturas mínimas obtém-se os valores mínimos de temperatura dos dois dias típicos.

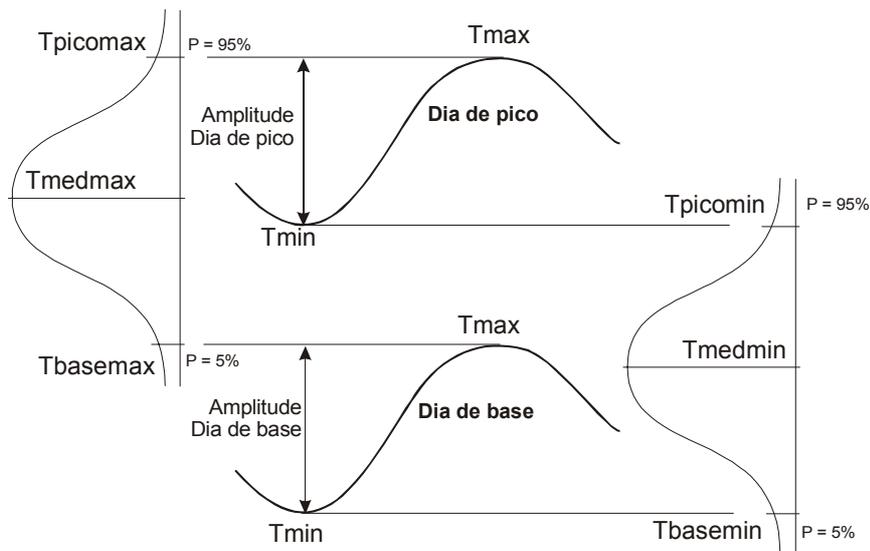


Figura 6. Valores de temperatura utilizados na caracterização dos dois dias típicos mensais.

Para representar a influência da radiação solar incidente nas superfícies externas do ambiente foi utilizado o modelo de cálculo apresentado em ASHRAE (1997) que permite o cálculo da radiação solar global incidente em uma superfície dada a sua latitude, longitude, azimute, inclinação e hora do dia. O modelo permite apenas o cálculo para o dia 21 de cada mês do ano para condições de céu claro.

3.3. Estimativa de consumo

O uso final de energia elétrica em edificações não residenciais é dividido basicamente em: iluminação, condicionamento de ar e demais equipamentos elétricos (conectados a tomadas). O consumo de energia elétrica provocado por sistemas de iluminação artificial pode ser estimado diretamente pela multiplicação da potência solicitada pelo sistema, em W ou kW, e o seu período de utilização, em horas. A mesma consideração pode ser adotada para equipamentos elétricos que não sofrem alterações significativas de desempenho em função do ambiente externo, como temperatura, umidade relativa e radiação solar, por exemplo.

Para a estimativa de consumo de energia do sistema de condicionamento de ar, além das cargas internas e padrão de operação, deve-se considerar também a influência de variáveis externas no desempenho do climatizador, assim como a condição de funcionamento, se o equipamento está sendo solicitado à plena carga ou carga parcial.

Winkelmann et al. (1993) apresentam curvas de desempenho obtidas de especificações técnicas disponíveis em catálogos de fabricantes de equipamentos de climatização, em função de variáveis como temperatura de bulbo seco (TBS) na entrada do condensador e temperatura de bulbo úmido (TBU) na entrada do evaporador. Aplicando-se essas funções em cada hora de cálculo do consumo, pode-se corrigir a capacidade total e sensível do climatizador, além do seu EIR (*Energy Input Ratio*), de acordo com as condições de temperaturas às quais está submetido. O EIR é uma medida de eficiência de condicionadores de ar que representa a potência de energia solicitada pelo equipamento, em W, para retirar 1 W de carga térmica do ambiente. No cálculo do EIR não é considerada a potência elétrica solicitada pelo ventilador.

Inicialmente, o algoritmo proposto irá contemplar apenas equipamentos de expansão-direta do, tipo *self-contained*, *split* e aparelhos de janelas (PTAC – *Packaged Terminal Air Conditioner*). Para modelar esses equipamentos foram utilizadas 3 funções para ajuste do desempenho do climatizador em função da TBU interna e TBS externa.

O fator de correção f_1 calculado pela Eq. (11) é utilizado para corrigir a capacidade de resfriamento sensível do climatizador a partir da temperatura de bulbo seco na entrada do condensador ($y = TBS$ externa) e da temperatura de bulbo úmido na entrada do evaporador ($x = TBU$ interna). O fator f_2 (Eq. (12)) é utilizado para corrigir a capacidade de resfriamento total e o fator f_3 (Eq. (13)) é utilizado para corrigir o EIR, ambos em função da TBS externa (y) e TBU interna (x). Para uso dessas equações, as temperaturas devem ser informadas sempre em °F, sendo que o limite mínimo admitido para TBS externa é de 70°F (21,1°C) e TBU interna é 50°F (10,0°C). A partir desses limites, considera-se que o desempenho do equipamento não é mais alterado (LBL/LANL, 1980).

$$f_1 = 6.3112707 - 0.1129951x + 0.0004334x^2 + 0.0037738y - 0.0000499y^2 + 0.0000637xy \quad (11)$$

$$f_2 = 1.1839345 - 0.0081087x + 0.000211x^2 - 0.0061425y + 0.0000016y^2 - 0.000003xy \quad (12)$$

$$f3 = -0.6550461 + 0.038891x - 0.0001925x^2 - 0.0013046y + 0.0001352y^2 - 0.0002247xy \quad (13)$$

Multiplicando-se o fator f1 pela capacidade sensível do climatizador obtém-se a capacidade sensível instantânea dadas as condições de temperatura da hora de cálculo. O mesmo procedimento é adotado para obter a capacidade total e o EIR instantâneo, multiplicando-se f2 e f3, respectivamente, pelos valores nominais do equipamento.

3.4. Verificação do método

A verificação da acuracidade do método é feita através da simulação de modelos no programa desenvolvido e no VisualDOE, utilizando-se o arquivo climático TRY para a cidade de Florianópolis. Inicialmente foi simulado um escritório de 10 x 10 m e a partir dele foram criados mais 3 modelos alterando-se 6 variáveis que mais influenciavam no desempenho da edificação em relação ao clima:

- a) tamanho do modelo (e formato – retangular ou quadrado): 100m² (10x10m) e 360m² (12x30m);
- b) transmitância térmica global das paredes (U_{par}): 1,74W/m².K (tijolos cerâmicos de 6 furos rebocados) e 2,65W/m².K (blocos estruturais de concreto de 19x19x39cm, rebocados);
- c) transmitância térmica global da cobertura (U_{cob}): 0,44W/m².K (laje de concreto de 7cm com lã de rocha de 9cm de espessura) e 2,18W/m².K (telhado de fibro-cimento e laje de concreto de 10cm);
- d) área envidraçada nas fachadas (WWR – *Window to Wall Ratio*): 20% e 80%;
- e) carga interna (ILD – *Internal Load Density*): 0 e 15W/m², representando ocupação, iluminação e equipamentos;
- f) absorvidade das paredes e cobertura à radiação solar: 30% e 70%.

Em todos os modelos simulados adotou-se um padrão de uso de 10 horas diárias, das 8h às 18h, em todos os dias da semana. Adotou-se temperatura de controle da sala de 24°C e EIR de 2,0Wcap/Welétrico para o condicionador de ar.

A taxa de renovação de ar foi mantida em 7 l/s/pessoa durante o funcionamento do ar-condicionado e a infiltração de ar em 0,5 troca por hora, fora do horário de funcionamento do prédio, ou seja, das 19h às 8h do dia seguinte. Durante o horário de funcionamento do ar-condicionado considerou-se o prédio totalmente lacrado, sem infiltração ou perda de ar.

As janelas foram colocadas apenas nas fachadas norte e leste, com vidros simples de 3mm (*single clear*). Os modelos com 12x30m foram posicionados com a maior fachada para o norte, conforme mostra a Figura 7.

A Tab. (2) apresenta uma descrição resumida dos 4 modelos simulados, com os valores adotados para as 6 variáveis analisadas.

Tabela 2. Descrição dos 4 modelos simulados para teste do algoritmo.

Modelo	Tamanho (m)	U _{par} (W/m ² .K)	U _{cob} (W/m ² .K)	WWR	ILD (W/m ²)	Absortividade
Modelo 1	10x10	1,74	0,44	20%	0	30%
Modelo 2	10x10	2,65	2,18	80%	15	70%
Modelo 3	12x30	1,74	0,44	20%	0	30%
Modelo 4	12x30	2,65	2,18	80%	15	70%

4. Resultados

O primeiro modelo simulado para teste do algoritmo apresentava 10m de largura por 10m de comprimento, com paredes de tijolos cerâmicos (U_{par} = 1,74W/m².K) e cobertura de concreto isolada com lã de rocha (U_{cob} = 0,44W/m².K). A área de janela das fachadas norte e leste correspondia a 20% da área de parede e a absorvidade à radiação solar das paredes e cobertura era de 30% (representando uma cor clara). Não foi incluída qualquer carga interna (ILD = 0 W/m²).

Este primeiro modelo apresentou um consumo total anual 7,6% superior ao simulado no VisualDOE. A Fig. (8) apresenta o consumo mensal estimado pelo algoritmo e pelo VisualDOE, sendo que a maior diferença percentual ocorreu em agosto (26,1%) e a menor em julho (2,5%). A diferença média mensal foi de 12,8%, considerando-se os valores absolutos da diferença percentual entre os dois programas.

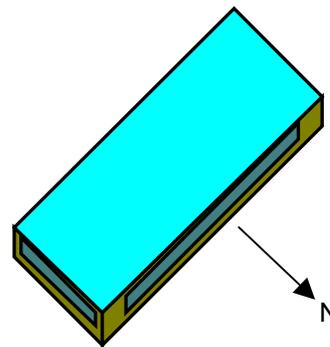


Figura 7. Modelo geométrico visto em perspectiva.

Nota-se que as maiores diferenças ocorrem em meses de “meia estação”, como março, abril, agosto e setembro. Nesses meses, o número de dias em que o condicionador de ar permanece ligado é mais difícil de ser estimado, devido às variações bruscas de temperatura de um dia para o outro que ocorrem em Florianópolis nesta época do ano. Mesmo assim, os resultados apontam para um bom desempenho do programa quando comparado a outro de simulação horária e muito mais detalhada, como o VisualDOE.

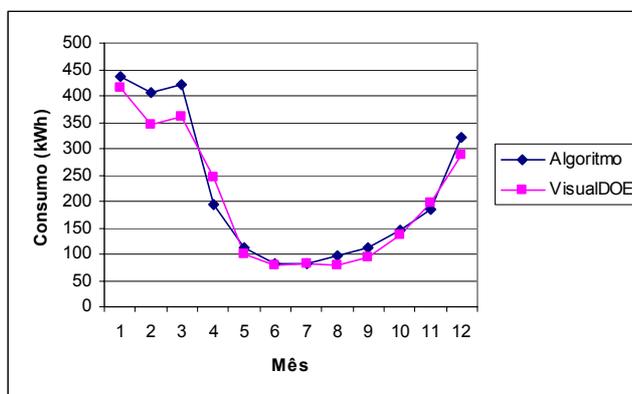


Figura 8. Consumo mensal do Modelo 1 estimado pelo algoritmo desenvolvido e pelo programa VisualDOE.

O segundo modelo simulado também possuía 10m de largura por 10m de comprimento, mas com paredes de blocos de concreto ($U_{par} = 2,65W/m^2.K$) e cobertura de fibro-cimento e laje de concreto ($U_{cob} = 2,18W/m^2.K$). A área de janela na fachada norte e leste correspondia a 80% da área de parede e a absorvidade à radiação solar das paredes e cobertura era de 70% (representando uma cor escura). A carga térmica interna era de $15W/m^2$, representados por 1 pessoa, $3,75W/m^2$ de equipamentos e $9,5W/m^2$ de potência instalada em iluminação.

Este segundo modelo apresentou um consumo total anual 0,5% inferior ao simulado no VisualDOE. A Fig. (9) apresenta o consumo mensal estimado pelo algoritmo e pelo VisualDOE, sendo que a maior diferença percentual ocorreu em maio (-19,2%) e a menor em agosto (0,5%). A média absoluta das diferenças mensais foi de 12,1%.

Como no Modelo 1, nota-se que ocorrem grandes diferenças nos meses de “meia estação” – março, abril e maio. No inverno, o ângulo de incidência do sol nas paredes verticais é menor (tendendo à perpendicularidade), o que aumenta a influência da radiação solar na carga térmica total da edificação. O consumo mais baixo nessa época parece revelar uma deficiência do algoritmo na representação dos ganhos de calor e da carga térmica proporcionada pela radiação solar, uma vez que este modelo apresenta maior área envidraçada e a cor mais escura nas superfícies externas (absorvidade = 70%).

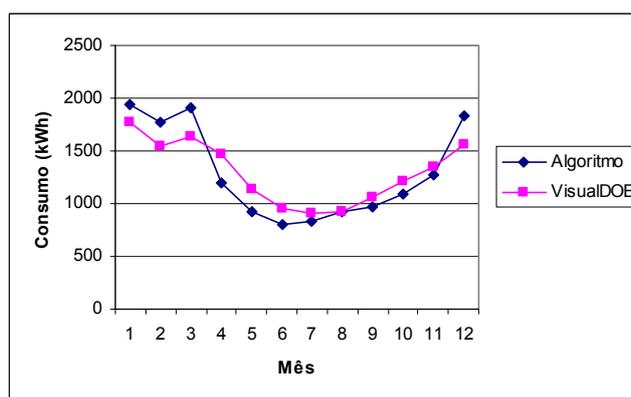


Figura 9. Consumo mensal do Modelo 2 estimado pelo algoritmo desenvolvido e pelo programa VisualDOE.

O terceiro modelo simulado foi uma edificação de 12m de largura por 30m de comprimento, com paredes de tijolos cerâmicos ($U_{par} = 1,74W/m^2.K$) e cobertura de concreto isolada com lã de rocha ($U_{cob} = 0,44W/m^2.K$). A área de janela das fachadas norte e leste correspondia a 20% da área de parede e a absorvidade à radiação solar das paredes e cobertura era de 30% (representando uma cor clara). Não foi incluída qualquer carga interna ($ILD = 0 W/m^2$).

Este terceiro modelo apresentou um consumo total anual 12,1% superior ao simulado no VisualDOE. Observa-se na Fig. (10) que as maiores diferenças no consumo mensal ocorreram em setembro (41,2%) e agosto (38,9%), sendo que a menor diferença foi registrada em dezembro (-2,7%). Nota-se que o aumento das superfícies externas – paredes, cobertura e janelas – provocou um aumento na diferença entre o consumo mensal simulado pelo algoritmo e pelo VisualDOE. Enquanto no Modelo 1 a diferença média mensal era de 12,8%, no Modelo 3 esse valor subiu para 19,3%.

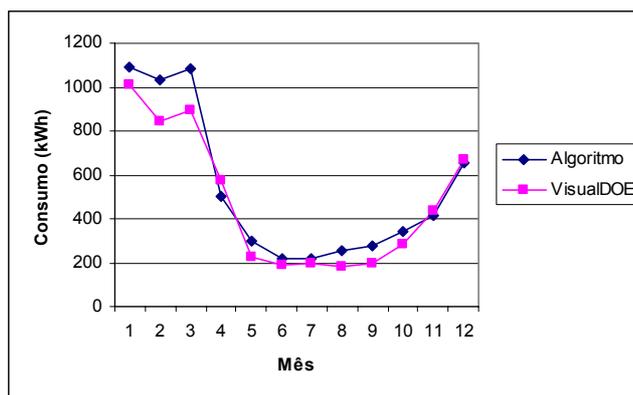


Figura 10. Consumo mensal do Modelo 3 estimado pelo algoritmo desenvolvido e pelo programa VisualDOE.

O último modelo simulado (Modelo 4) foi uma edificação de 12x30m, com paredes de blocos de concreto ($U_{par} = 2,65W/m^2.K$) e cobertura de fibro-cimento e laje de concreto ($U_{cob} = 2,18W/m^2.K$). A área de janela na fachada norte e leste correspondia a 80% da área de parede e a absorvidade à radiação solar das paredes e cobertura era de 70% (representando uma cor clara). A carga térmica interna era de $15W/m^2$, representados por 5 pessoas, $3,75W/m^2$ de equipamentos e $9,5W/m^2$ de potência instalada em iluminação.

O Modelo 4 apresentou um consumo total anual 8,3% inferior ao simulado no VisualDOE. A Fig. (11) mostra uma maior diferença no consumo mensal em abril (-22,9%) e a menor diferença em janeiro (-0,7%).

Assim como no Modelo 2, o quarto modelo simulado também possuía carga interna e o consumo mensal estimado também foi, em geral, mais baixo que o simulado no VisualDOE. Em ambos os modelos, a absorvidade das superfícies externas era de 70%, enquanto que nos outros modelos simulados (1 e 3) a absorvidade era de 30%. Após a simulação do Modelo 2, notou-se uma tendência do algoritmo considerar menor influência da radiação solar sobre a carga térmica do que o VisualDOE. Os resultados do Modelo 4 parecem comprovar essa tendência, à medida em que o consumo estimado pelo algoritmo foi ainda menor para uma edificação maior e superfícies mais escuras.

O menor consumo no verão diminuiu a diferença mensal média do algoritmo em relação ao VisualDOE, de 12,1% no Modelo 2 para 11,0% no Modelo 4.

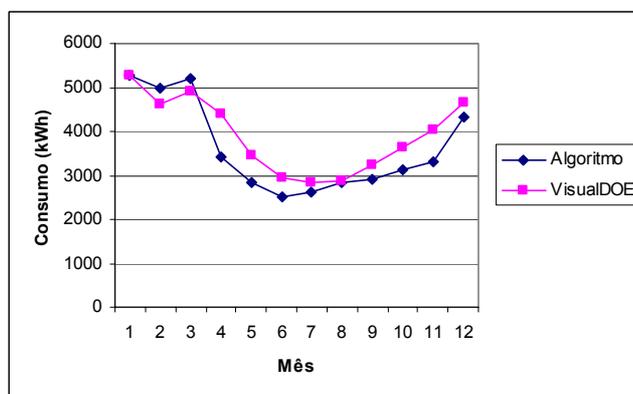


Figura 11. Consumo mensal do Modelo 4 estimado pelo algoritmo desenvolvido e pelo programa VisualDOE.

5. Conclusões

O método de estimativa de consumo de energia elétrica em edificações proposto neste trabalho ainda está em desenvolvimento, buscando-se aperfeiçoar a representação da radiação solar incidente na edificação. No entanto, os modelos simulados para teste já revelaram bons resultados quando comparados ao software de simulação horária, VisualDOE.

A simulação de 4 modelos de edificações com clima de Florianópolis revelou uma diferença média de 14% frente ao consumo mensal simulado no VisualDOE, com máximo de 41,2% e mínimo de 0,1%. A diferença máxima entre o consumo anual de energia elétrica foi de 12,1%. De um modelo para o outro foi variado: o tamanho e formato da edificação, a transmitância térmica dos componentes construtivos, a área de janelas nas fachadas norte e leste, a carga interna (ocupação, equipamentos elétricos e sistema de iluminação) e absorvidade à radiação solar das superfícies externas.

As maiores diferenças foram detectadas nos meses de “meia estação”, durante o outono e a primavera. Nesse período, as variações bruscas de temperatura de um dia para o outro são mais comuns em Florianópolis, o que dificulta a estimativa do número de dias em que o condicionador de ar permanece ligado. Além disso, o baixo consumo estimado nos meses de inverno para os modelos com maior área de janelas indica uma dificuldade na representação da radiação solar incidente na edificação.

Apesar dessas diferenças, ainda que significativas em alguns casos simulados, a utilização prática do algoritmo proposto é aceitável, principalmente para a comparação do consumo anual de energia elétrica entre diferentes alternativas de retrofit para uma edificação. A influência do uso de diferentes componentes construtivos, tipo de vidro, área de aberturas e absorvidade (cor) de superfícies externas são algumas das variáveis que podem ser testadas rapidamente para uma edificação.

Alguns recursos devem ser incluídos ao programa para aumentar o campo de aplicação. O modelo de edificações com várias zonas térmicas e pavimentos, além da modelagem de outros sistemas de condicionamento de ar, incluindo expansão indireta, são algumas das implementações sugeridas.

5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado concedida a Fernando Simon Westphal, permitindo o desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências

- ASHRAE, 1997, “ASHRAE handbook – Fundamentals”. American Society of Heating, Refrigeratin and Air-Conditioning Engineers, Inc. USA, Atlanta: 1997.
- ASHRAE, 2001, “ASHRAE handbook – Fundamentals”. American Society of Heating, Refrigeratin and Air-Conditioning Engineers, Inc. USA, Atlanta: 2001.
- Departamento Nacional de Meteorologia, 1992, “Normais Climatológicas (1961/1990)”. Governo Federal, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Secretaria Nacional de Irrigação. 84p.
- Geller, H. S. (1991). O uso eficiente da eletricidade: uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil. Rio de Janeiro: INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. 223p.
- Goulart, S. V. G., Lamberts, R e Firmino, S., 1998, “Dados climáticos de 14 cidades brasileiras para projeto e avaliação de sistemas de ar-condicionado”. Eletrobrás, Procel, Núcleo de Pesquisa em Construção, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Hill, James E; Furlong, Richard R, 1973, “ASHRAE Cooling Load Calculation”. ASHRAE Journal May 1973, p 61-66.
- LBL/LANL, 1980, “DOE-2 Reference Manual – Part I”. Version 2.1A. Lawrence Berkeley Laboratory (LBL-8706 Rev. 1) and Los Alamos National Laboratory (LA-7689-M Ver. 2.1). Prepared for the U.S. Department of Energy.
- LBL/LANL, 1982, “DOE-2 Engineers Manual”. Version 2.1A. Lawrence Berkeley Laboratory (LBL-11353) and Los Alamos National Laboratory (LA-8520-M). Technical Information Center, United States Department of Energy.
- Mitalas, Gintas P., 1972, “Transfer Function Method of Calculating Cooling Loads, Heat Extraction and Space Temperature”. ASHRAE Journal, December 1972. p 54-57.
- Pedersen, C. O.; Fisher, D. E.; Spitler, J. D.; Liesen, R. J., 1998, “Cooling and Heating Load Calculation Principles”. American Society of Heating, Refrigeratin and Air-Conditioning Engineers, Inc. USA, 1998. 248 p.
- Sowell, E. F., 1988, “Classification of 200,640 parametric zones for cooling load calculations”. ASHRAE Transactions 94(2): 754-77.
- Winkelmann, F. C. et al., 1993. DOE-2 Supplement Version 2.1E. Lawrence Berkeley Laboratory, USA, California. LBL-34947.

PREDICTION OF THE ELECTRIC ENERGY CONSUMPTION OF NONRESIDENTIAL BUILDINGS USING SIMPLIFIED WEATHER DATA

Fernando Simon Westphal

UFSC / CTC / ECV / LabEEE – Campus Universitário – Trindade, Cx. Postal 476 CEP 88040-900 – Florianópolis, SC
fernando@labeee.ufsc.br

Roberto Lamberts

UFSC / CTC / ECV / LabEEE – Campus Universitário – Trindade, Cx. Postal 476 CEP 88040-900 – Florianópolis, SC
lamberts@ecv.ufsc.br

José Antônio Bellini da Cunha Neto

UFSC / CTC / EMC / LMPT – Campus Universitário – Trindade, Cx. Postal 476 CEP 88040-900 – Florianópolis, SC
bellini@lmpt.ufsc.br

Abstract. *This work presents a methodology for electric energy consumption in nonresidential buildings using simplified weather data. Two typical days are generated from average of maximum and minimum daily temperatures for each month. The cooling load calculation for these days is done by Transfer Function Method (TFM), presented in the ASHRAE Handbook of Fundamentals 1997. The daily electricity consumption of cooling systems is predicted from hourly cooling load in the room and equipment performance curves. The monthly consumption is generated by interpolation between the day with lowest cooling load and the peak cooling load day. The method accuracy is evaluated with computer simulation in the software VisualDOE (graphical interface for DOE-2.1E). Differences lower than 15% were detected between annual electric energy consumption predicted by method and VisualDOE.*

Keywords: *building simulation, energy efficiency, weather data.*